

"Determinação da rigidez torcional de um veículo offroad por métodos experimentais e computacionais"**"Determination of torsional stiffness of an offroad vehicle by experimental and computational methods"**

DOI:10.34117/bjdv5n7-222

Recebimento dos originais: 26/07/2019

Aceitação para publicação: 08/08/2019

Mateus Coutinho de Moraes

Graduando em Engenharia Mecânica - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"

Instituição: Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira

Endereço: Av. Brasil Sul, nº 56, Centro, Ilha Solteira - SP

E-mail: mateuscouthom@gmail.com

Ana Caroline Garcia Feltrini de Souza

Graduanda em Engenharia Mecânica - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"

Instituição: Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira

Endereço: Av. Brasil Sul, nº 56, Centro, Ilha Solteira - SP

E-mail: carolgfeltrini@gmail.com

Miguel Ângelo Menezes*

Professor Assistente Doutor – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"

Instituição: Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira

Endereço: Av. Brasil Sul, nº 56, Centro, Ilha Solteira - SP

E-mail: miguel.menezes@unesp.br

RESUMO

O chassi de um carro pode ser interpretado como uma grande mola que liga as suspensões traseira e dianteira. Um chassi flexível adiciona outra mola a um sistema já complexo e não se pode ter controle sobre a manobrabilidade e, principalmente, sobre a transferência de carga lateral do veículo. Dessa forma, a rigidez torcional representa um dos principais critérios do design de um chassi. Com isso, o intuito desse trabalho é descrever a obtenção dessa propriedade por meio de simulações empregando o método de elementos finitos e a posterior validação do modelo com a realização do ensaio prático. Dessa forma busca-se o desenvolvimento de uma metodologia para o projeto de futuros chassis, principalmente, avaliando o papel da rigidez torcional na transferência de carga lateral.

Palavras-Chave: rigidez torcional, distribuição de carga lateral, validação**ABSTRACT**

The chassis of a car can be interpreted as a large spring connecting the rear and the front suspensions. A flexible chassis adds another spring to an already complex system and you

can not have control over the maneuverability and especially the lateral load transfer of the vehicle. Therefore, the purpose of this work is to describe the obtaining of this property by means of simulation using the finite element method and the subsequent validation of the same with practical test. Thus, the development of a methodology for the design of future chassis is sought, mainly, evaluating the importance of the chassis' torsional stiffness in lateral load transfer.

Keywords: torsional stiffness, lateral load transfer, validation

1 INTRODUÇÃO

Chassi é definido como a estrutura base de um veículo motorizado em que o mesmo é construído. Tem a função de conter, suportar, conectar as outras partes. Idealmente o primeiro propósito de um chassi de carro a motor é conectar as 4 rodas com uma estrutura rígida à dobra e torção. Tem de suportar todos os componentes e deve absorver todas as cargas sem deflexão. Além do mais deve conectar os sistemas de suspensão, proteger o piloto contra acidentes, transmitir cargas de trabalho além de acomodar os componentes do powertrain dentre outros sistemas auxiliares.

A rigidez torcional de um chassi é uma informação de suma importância por estar relacionada com as respostas dinâmicas do veículo e é modelada normalmente ao se conectar os eixos por meio de uma mola de torção. Fatores como a dirigibilidade bem como vibrações são primordiais, já que uma estrutura mais rígida implica em menores deformações do protótipo ao longo do trajeto. O problema de se achar a melhor relação entre rigidez do chassi, peso e custo é de grande importância tanto no desenvolvimento de carros de alta performance quanto nos veículos populares (eficiência em custo e consumo).

A manobrabilidade e o comportamento vibracional de um veículo são diretamente influenciados pela rigidez do chassi. Rigidez à flexão é definida como a deflexão vertical simétrica de um ponto próximo ao centro da base da roda quando cargas estáticas são aplicadas sob o veículo. A rigidez torcional relaciona a deflexão torcional da estrutura quando sujeita à um torque puro agindo no eixo longitudinal do veículo. Para os carros de competição, os principais fatores relacionados à rigidez torcional são transferência de carga lateral, aspectos dinâmicos e cinemática da suspensão. (Sampò, 1991).

O conhecimento das diferentes configurações de chassi também é outro tópico relevante. Os principais tipos são o escada, monocoque, backbone, space frame e a monobloco. A primeira configuração é bem simples com membros longitudinais(longarinas) e outros transversais(travessas). Os suportes são prolongamentos desses membros e os

pontos da suspensão não precisam estar integrados ao projeto. O monocoque é composto por uma estrutura única com os demais membros soldados.

Na disposição backbone há um túnel no centro servindo como referência. Mas essa estrutura não é muito utilizada por não haver proteção lateral e a presença do tubo central dificultar a manutenção. Os chassis do tipo space frame são compostos por membros em três planos, dessa forma não há cargas de torção e flexão. O processo de fabricação é muito complexo sendo executado em algumas empresas especializadas em veículos de alta performance. Já a estrutura monobloco, presente na maioria dos carros comerciais, o chassi, carroceria bem como a estrutura frontal se encontram soldados formando uma unidade. É necessário a presença de longarinas e travessas para reforçar a integridade do conjunto projetado.

Pode-se medir a rigidez torcional de um chassi de diversas formas. Cada modo consiste no princípio básico de fixar uma extremidade do chassi e aplicar um momento torçor na outra extremidade de tal forma que a torção ocorra e seja medida. Sendo o ângulo de torção medido para um respectivo momento torçor T

A rigidez à flexão não é tão importante quanto a rigidez torcional. A alteração no desempenho é mais significativa quando acontece deformação torcendo o veículo. Uma série de problemas surgem quando há falta de rigidez no chassi tais como: (Sampò, 1991).

- Dificuldade no controle de distribuição da carga lateral;
- Falta de dirigibilidade;
- Vibrações podem ser ocasionadas;
- Deslocamentos necessários no chassi na conexão com suspensão, assim não se garante o controle dos pneus;
- Comportamento do veículo fica imprevisível o que pode também ocasionar fadigas.

As bancadas de ensaio podem ter 3 configurações, sendo que em cada uma os suportes possuem um determinado arranjo. Em todas as disposições, o princípio de se manter a traseira fixa ao se aplicar um momento torçor na parte dianteira. As configurações são as seguintes:

- Pivô no centro: dois suportes fixos na traseira e o terceiro ponto se localiza no centro da dianteira;



Figura 1: Imagem apoio pivô no centro

- Pivô no canto: assim como no caso anterior há dois suportes fixos na traseira, no entanto o pivô agora se encontra no canto. Tanto nessa disposição quanto na anterior uma carga vertical fora do centro longitudinal é aplicada na dianteira para gerar um momento torçor no chassi;

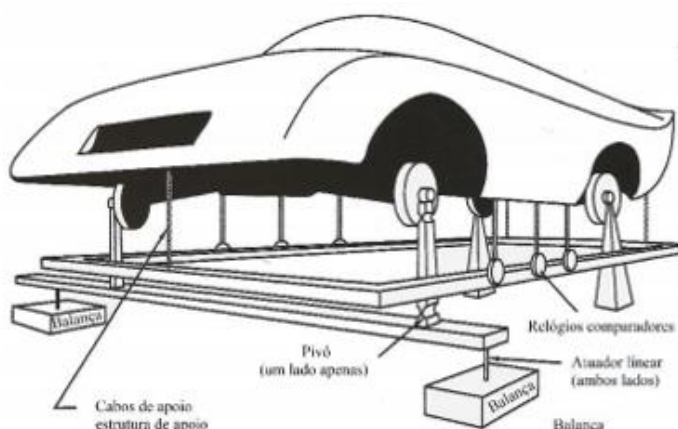


Figura 2: Imagem apoio pivô no canto

- Dois suportes rígidos: essa configuração possui quatro pontos de apoio com o chão, sendo que apenas os suportes traseiros se mantêm fixos no chão. Os suportes da dianteira geram deslocamentos verticais de tal forma que um torque é gerado.

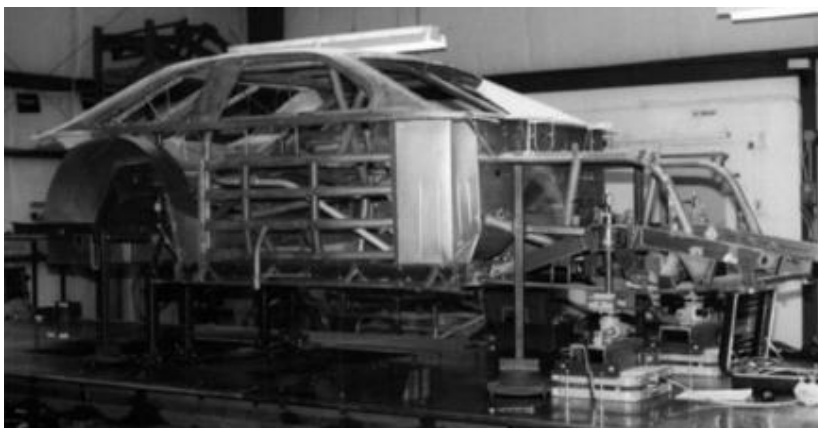


Figura 3: Imagem dois suportes rígidos

As condições de operação no estado estacionário são velocidade constante na curva bem como aceleração longitudinal e estrada lisa, ou seja, sem irregularidades. Também todos os dados do carro usados nos cálculos são lineares (taxas de rolagem e K das molas) e dados básicos de dimensões (altura de CG e entreixos) são constantes. Pensando no chassi como uma grande mola que liga as suspensões traseira e dianteira. Se a mola de torção do chassi for fraca, as tentativas de controlar a distribuição da transferência de carga lateral serão confusas na melhor das hipóteses e impossíveis no pior caso. Isso ocorre porque um chassi flexível adiciona outra mola a um sistema já complexo. O manuseio previsível pode ser melhor alcançado se o chassi for rígido o suficiente para ser ignorado com segurança. O intuito da rigidez torcional é proporcionar uma plataforma rígida para a suspensão permitindo que as cargas laterais sejam distribuídas da frente para trás proporcionalmente à rigidez de rolagem da suspensão. (Milliken, 1995)

Segundo (Milliken, 1995), compare a rigidez de rolagem dianteira e traseira com a rigidez de torção do chassi, ele deve resistir aproximadamente a diferença entre as taxas de distribuição entre as taxas de rotação dianteira e traseira. No entanto, estudos mais recentes comprovaram que há proporcionalidade entre a rolagem da suspensão e a rigidez do chassi, por um número múltiplo que varia de acordo com cada projeto.

2 METODOLOGIA

As análises de elementos finitos realizadas, são realizadas utilizando o software *Ansys* fornecido pela ESSS.

Para as análises realizadas no chassi do protótipo, de modo geral, são utilizados elemento de casca para modelar os tubos, a fim de obter uma malha mais uniforme e facilitar o processamento da geometria durante a simulação. No processo de converter a geometria para casca, são definidas as espessuras (parede) dos tubos.

A malha utilizada foi gerada utilizando fator de relevância 50, e função de “Proximidade e Curvatura” para definir o tamanho dos elementos da malha resultando em um total de 179891 nós e 180762 elementos.

A análise em si, consiste em engastar o chassi nos pontos de apoio da suspensão traseira, enquanto aplica-se um binário de forças verticais (somente no eixo Y) nos pontos de apoio dos amortecedores dianteiros, e então medir as deformações nesses pontos. Dentro do software, o chassi foi engastado usando “Fixed Supports”, e as forças verticais “diretas” (Force), respectivamente nos pontos especificados como pode ser visto na figura:

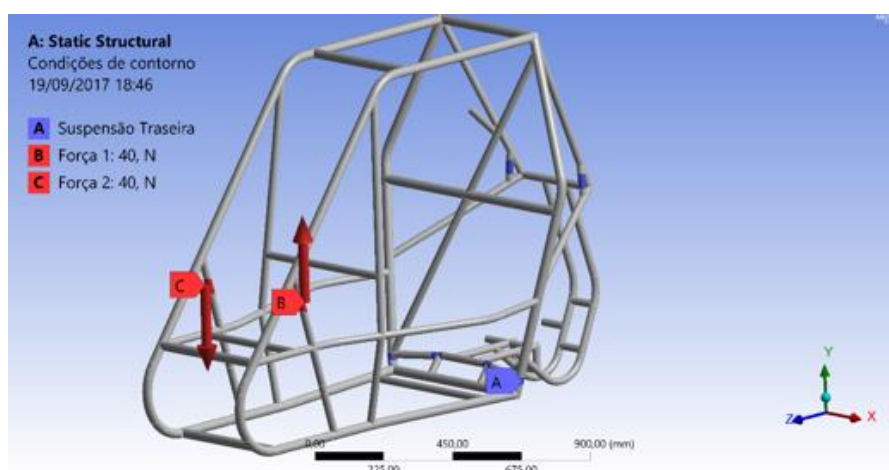


Figura 4: Condições de contorno utilizadas na simulação

As “medições” foram feitas utilizando a ferramenta “Directional Deformation” nas direções X e Y, variando as forças de 39,24N até 156,96N, já que foram esses os valores utilizados no experimento prático. Com os resultados da simulação foi construído um gráfico Torque x Deformação angular.

O torque e a deformação angular foram calculadas da seguinte maneira:

$$T = FL \quad (1)$$

E,

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{|y_{\min}| + |y_{\max}|}{180L/\pi} \right) \quad (2)$$

Onde:

T: Torque [Nm]; L: Distância entre as duas forças aplicadas [m]; θ : Deformação angular [°]; y_{\max} : Deformação máxima na direção Y [m] e y_{\min} : Deformação mínima na direção Y [m].

O ensaio de rigidez torcional consiste na aplicação de uma força binaria no eixo da suspensão dianteira, e a fixação da suspensão traseira, de modo a restringir seu movimento em todas as direções.

Para o ensaio foram utilizados três apoios. Dois apoios rígidos são fixados na traseira do chassi e no chão impedindo todos os graus de liberdade. Nesses apoios é fixada uma barra que passa entre os trailing arms traseiros para o travamento da traseira, na qual são soldados os dois apoios. O terceiro apoio é colocado no centro da dianteira. Uma força é aplicada fora do centro da dianteira causando um torque conhecido no chassi do veículo.



Figura 5: Apoios utilizados no aparato experimental

O torque gerado resulta em um ângulo de torção, conforme esquematizado segue:

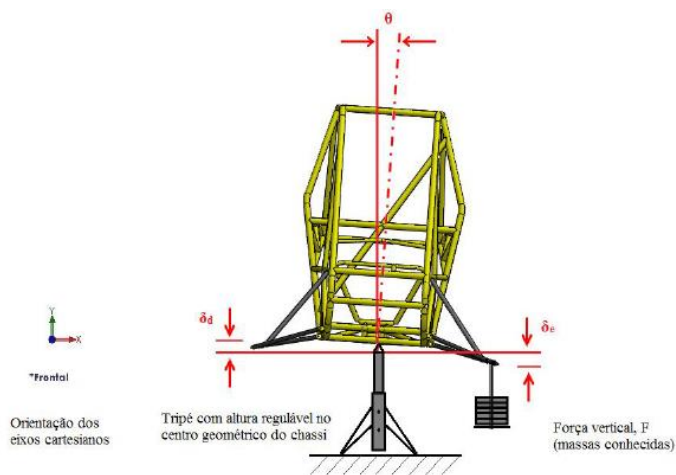


Figura 6: Esquema representativo do ensaio de rigidez torcional

Um suporte com os pesos foi colocado na ponta de eixo da roda dianteira, em cada ponta desses eixos colocou-se um relógio comparador com precisão de um milésimo de milímetro para obtenção dos deslocamentos. Ao ocorrer a deformação, um relógio comparador mede o quanto deformava para cima, e o outro o quanto para baixo.



Figura 7: Suporte com anilhas e o relógio comparador e posicionamento do relógio comparador, respectivamente

Dos elementos do carro foram retiradas a maior parte dos subsistemas como os da transmissão, parte eletrônica, os componentes do freio, direção e da suspensão, mantendo-se desta apenas a manga e a ponta de eixo. Para anular o efeito dos amortecedores do carro foram utilizados metalões rígidos. O grau de liberdade da manga que permite o movimento da roda foi compensado ao se amarrá-la às bandejas da suspensão com o uso de arame de aço.



Figura 8: Metalon substituindo os amortecedores e suporte para anilhas, respectivamente

Devido à limitação de material, foi aplicada uma carga máxima de 156,96 N. Foram usadas quatro anilhas de 4 Kg. O torque máximo obtido foi 98,1 N.m. Aferiu-se os deslocamentos 5 vezes, tanto no carregamento quanto no descarregamento das massas. O aparato final do ensaio é o seguinte:



Figura 9: Ensaio montado

A fórmula utilizada para se obter o torque é:

$$T_{prat} = FD \quad (3)$$

Sendo D a distância entre o ponto de pivotamento do carro até um relógio comparador. Já para o ângulo, temos:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{|y_{min}| + |y_{max}|}{180J/\pi} \right) \quad (4)$$

Na qual J é a distância entre os relógios comparadores. Com os dados obtidos do ensaio, foi montado um gráfico do torque pelo ângulo de deformação. O valor do coeficiente angular representa o valor da rigidez experimental

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a simulação as forças foram variadas de 100 a 1000 N e os valores máximos e mínimos de deformação foram os seguintes:

Força (N)	Deformação máxima (mm)	Deformação mínima (mm)
100	0,23927	-0,2368
200	0,47853	-0,47361
300	0,7178	-0,71041
400	0,95706	-0,94721
500	1,1963	-1,184
600	1,4356	-1,4208
700	1,6749	-1,6576
800	1,9141	-1,8944
900	2,1534	-2,1312
1000	2,3927	-2,368

Tabela 1: Valores máximos e mínimos obtidos para cada força

O gráfico obtido foi o seguinte:

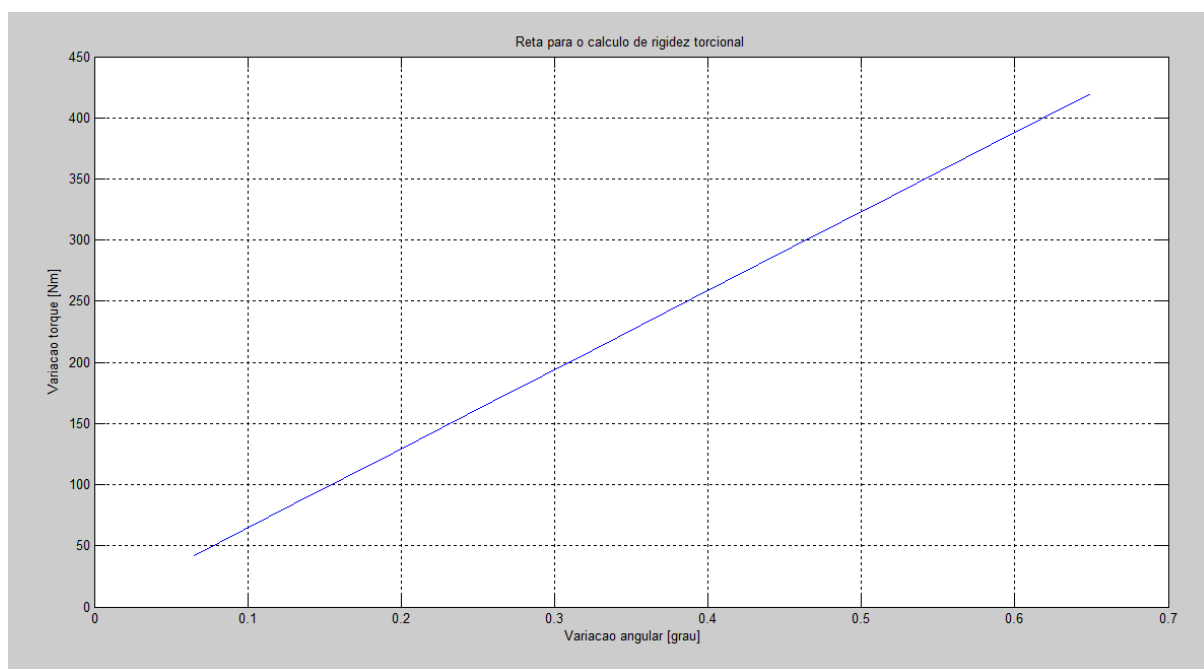


Figura 10: Gráfico representativo da rigidez torcional via simulação por elemento finitos

A inclinação dessa curva resultou em uma rigidez torcional teórica de 646,72 Nm/grau

Os dados práticos médios se encontram a seguir:

Força (N)	Deformação relógio esquerdo(mm) média	Deformação relógio direito (mm) média
39,24	0,706	0,28
78,48	1,382	0,559
117,72	2,06	0,849
156,96	2,772	1,183
156,96	2,876	1,235
117,72	2,295	0,937
78,48	1,636	0,63
39,24	0,943	0,315
0	0,088	0,016

Tabela 2: Valores médios de deformações obtidos no ensaio prático

Aferiram-se as deformações ao se carregar a 1ª massa de 4 kg até a 4ª e depois no descarregamento desta até a retirada de todas as massas. A distância entre o ponto de pivotamento e o relógio comparador foi de 62,5 centímetros enquanto a entre os 2 relógios comparadores foi de 143 centímetros. Assim com a aplicação das fórmulas (3) bem como de (4) o seguinte gráfico foi obtido:

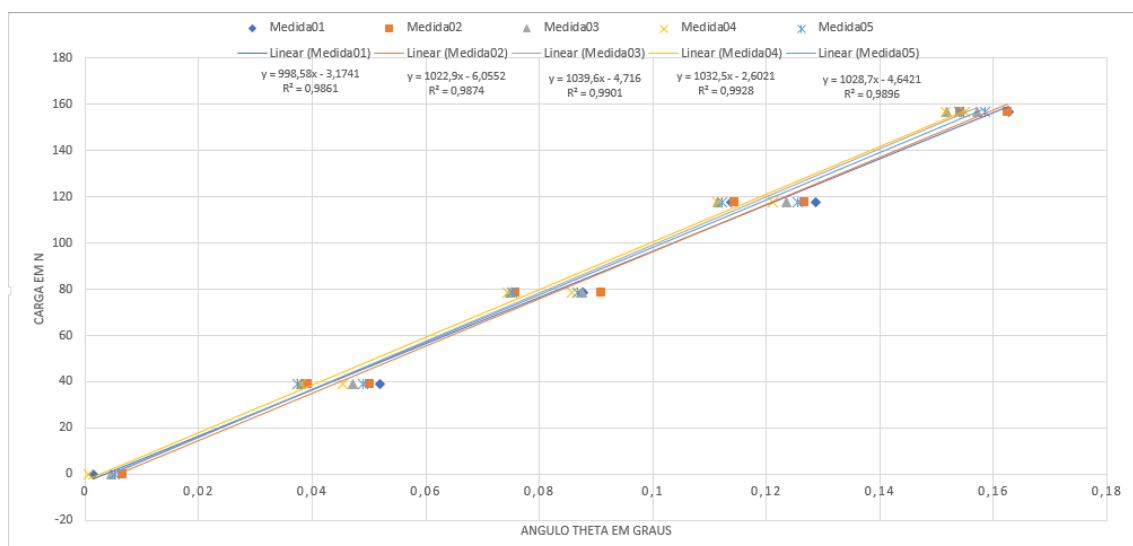


Figura 11: Retas representativas da rigidez torcional para cada uma das medidas

Fazendo-se o produto entre o coeficiente angular médio das 5 retas e o braço, a rigidez torcional prática é de 640,29 Nm/grau.

4 CONCLUSÃO

A comparação entre os valores teóricos (simulação) e práticos implicou em um erro percentual de 1%. Segundo a literatura, (Milliken, 1995), erros de até 20% são aceitáveis, comprovando a validade do ensaio realizado.

O cálculo da rigidez torcional é um importante parâmetro de projeto e o intuito deste ensaio é validar o modelo de elementos finitos utilizado no projeto do chassi da equipe TEC Ilha Baja. Além do mais o tratamento dos dados ao se avaliar a porcentagem de *roll stiffness* em relação à transferência de carga lateral é a próxima etapa dos estudos. O desenvolvimento de um modelo matemático para avaliar o quanto a rigidez torcional influencia na distribuição de carga lateral é uma alternativa de metodologia de projeto buscando-se sempre a evolução do veículo.

AGRADECIMENTOS

A UNESP, a Unidade e ao Departamento de Engenharia Mecânica pelo apoio material e financeiro.

REFERÊNCIAS

Douglas L. Milliken, William F. Milliken. Race Car Vehicle Dynamics. 1995.

Enrico Sampò, Modelling chassis flexibility in vehicle dynamics simulation. PhD thesis, 1991.

ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção ‘área de conhecimento do trabalho’.

- ☒ (X) Acústica, Vibrações e Dinâmica
- ☐ () Automação Industrial
- ☐ () Energia
- ☐ () Fabricação Mecânica e Materiais
- ☐ () Gestão de Manufatura
- ☐ () Mecânica Computacional
- ☐ () Mecânica dos Sólidos
- ☐ () Otimização e Análise
- ☐ () Projeto de Máquinas
- ☐ () Termociências e Mecânica dos Fluidos

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores Mateus Coutinho de Moraes, Ana Caroline Garcia Feltrini de Souza e Miguel Ângelo Menezes são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.